

# Chimistul nuclear care a prevăzut trecutul. Paul Kazuo Kuroda și reactorii naturali de la Oklo

## (The nuclear chemist who foresaw the past. Paul Kazuo Kuroda and the fossile reactors from Oklo)

TIBOR BRAUN

Institutul de Chimie, Universitatea L. Eötvös, Budapesta, Ungaria

---

The paper highlights the exceptional professional performance of the US nuclear chemist Paul Kazuo Kuroda and of the French analytical chemist Henri Boziges, which has led to the discovery of the Oklo phenomenon.

---

### 1. Introducere

Prezenta istorie începe cu descoperirea fisiunii nucleare [1,2] și a reacțiilor nucleare în lanț [3] și a culminat cu construcția reactorului nuclear inventat de Enrico Fermi și Leo Szilard. Acest reactor denumit de ei Pile-1 (CP-1) [4,5] a fost realizat în cadrul programului american supersecret de construcție a primei bombe atomice - "Manhattan Project". Reactorul a fost construit și instalat în secret sub stadionul de "squash" Alonzo Stagg Field al Universității din Chicago.

În aceasta instalație, care mai târziu (cu începere din 1952) a fost denumită reactor nuclear (reactor atomic) [6] (Fig. 1), reacția în lanț autosustenabilă și controlată a fost prezentată conducătorilor proiectului secret "Manhattan" de către Fermi, la 2 decembrie 1942.

În 1944, Fermi și Szilard au depus o cerere de brevet pentru instalația menționată la Oficiul de Brevete a SUA sub denumirea "Reactor Neutronic". Din probleme cauzate de război și secretizare, brevetul, având numărul 2.708.656 a fost publicat oficial numai la 17 mai 1955 (Fig.2).

Mult discutată și disputată istorie și, putem să spunem, soarta reactoarelor nucleare, începând cu cel prezentat mai sus, până la cele de cercetare științifică și la centralele nucleare, inclusiv evenimentele de la Cernobil și, mai recent, Fukushima, este bine-cunoscută. Tema are o literatură voluminoasă care poate umple biblioteci. Prezentarea acesteia este o sarcină ce depășește cadrul acestei lucrări și nici nu face parte din scopul lucrării de față.

### 2. Presupunerea

La 14 ani, după prezentarea reactorului inventat și pus în funcțiune de Fermi și Szilard în 1942, în revista americană *Journal of Chemical Physics* a apărut un articol nepretențios, de o singură pagină, având titlul: "On the nuclear physical stability of the uranium minerals" (Fig 3) [7]. În ciuda acestui titlu modest, articolul dorea să dovedească nu mai puțin decât că în minele de minereuri de uraniu, prin realizarea unor condiții geologice, dimensionale și climatice favorabile - cam acum 2 miliarde de ani: "the critical uranium chain reaction could have taken place" ar fi fost posibilă apariția reacției în lanț a uraniului, respectiv apariția unui reactor nuclear creat de natură.

Autorul articolului a fost Paul Kazuo Kuroda (Fig. 4) un chimist nuclear de origine japoneză, pe atunci profesor la University of Arkansas, Fayetteville în Statele Unite.

În ciuda ipotezei sale revoluționare, articolul ar fi rămas complet necunoscut și ar fi fost dat uitării, dacă, în anul 1972, nu ar fi avut loc un eveniment care a adus, în mod exploziv, articolul lui Kuroda în centrul atenției lumii științifice internaționale.

### 3. Programul atomic francez și proiectul militar "Force de Frappe" (Forța de lovire) al generalului de Gaulle

Comisia Franceză pentru Energie Atomică (*Commissariat de l'Energie Atomique, CEA*) a fost inițiată de generalul de Gaulle, imediat după terminarea celui de-Al Doilea Război Mondial, la 18 octombrie 1945. Astfel, Franța a devenit prima țară din lume care a instituit o comisie civilă de energie

atomică. În cadrul acesteia, în Franța a început cercetarea nucleară intensivă și au fost construite reactoare pentru cercetare și centrale nucleare. [8]

Deși după război generalul de Gaulle a insistat ca Franța să se înarmeze cu arme nucleare, datorită interdicțiilor de atunci servind menținerea păcii, aceasta s-a realizat numai în 1954, când, în cadrul proiectului *Force de Frappe* a început construcția bombei atomice franceze. [9]

Deși în anii 1950, în centrul Franței, în zona Limoges, au fost descoperite deja zăcăminte semnificative de uraniu și pentru prelucrarea acestora a fost construită uzina de îmbogățire de la *Pierrelatte*, pentru menținerea programului nuclear militar, rezervele franceze interne de uraniu s-au dovedit a fi insuficiente. De aici, a apărut necesitatea importului de uraniu din străinătate.

#### 4. Gabon-ul și minele de uraniu de la Oklo

Gabon este o țară centroafricană relativ mică, în comparație cu alte state de pe acest continent (Fig 5). Țara a fost o colonie franceză, dar astăzi este o republică independentă. La Nord se învecinează cu Guineea Ecuatorială și Camerunul, la Est și la Sud cu Republica Congo, iar la Vest cu Oceanul Atlantic.

În 1910, Gabon a devenit unul din cele patru teritorii ale Africii Ecuatoriale Franceze și a rămas, astfel, până în 1959. Teritoriul a devenit independent în 1960. Gabonul era încă o colonie franceză pe vremea când geologii de la secția industrială de la *Commissariat de l'Energie Atomique, CEA*, (mai apoi *COGEMA*, apoi *Areva NC*) au descoperit în 1956 zăcăminte de uraniu în acest loc îndepărtat de Europa. Franța a pornit imediat exploatarea și prelucrarea minereului abundent în uraniu sub comanda *COMUF (Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville)* în uzina de lângă satul *Mountana*. Statul Gabon a obținut proprietatea minoritară al acestei societăți. *Oklo* este o zonă lângă orașul *Franceville*, în provincia *Haut Ogoone* a Gabonului, la aproximativ 400 de kilometri de malul Oceanului Atlantic. În această zonă au fost exploatate minele de uraniu cele mai productive. (Fig 6). După măcinarea minereului în unitatea de preparare de lângă *Mountana*, din porturile țării au început să fie trimise în Franța, pe cale maritimă, transporturi săptămânale regulate de minereu de uraniu.

#### 5. Compoziția minereului de uraniu de la Oklo

După cum este cunoscut, uraniul are doi izotopi principali: U-235 fisionabil și U-238. Primul se înjumătățește mai repede decât al doilea, având timpul de înjumătățire de 0,71 miliarde de ani, față

de 4,51 miliarde de ani la al doilea. Ca urmare, proporția de nucleii fisionabili scade în timp, adică, în trecutul îndepărtat, concentrația U-235 era mult mai mare ca în prezent. (Fig.7 și Tabelul 1)

Cu alte cuvinte, deși ambii izotopi ai uraniului sunt radioactivi, ei au un timp de înjumătățire atât de lung, încât întreaga cantitate de uraniu, care a fost prezentă la formarea globului pământesc acum 4.51 de miliarde de ani, există și azi. În schimb, datorită înjumătățirii din fiecare 100.000 de atomi de uraniu, avem azi numai 750 atomi de uraniu-235.

Referitor la aceasta, acum 2.0 miliarde de ani, în minereul de la Oklo, ca și peste tot pe pământ, concentrația relativă a uraniului-235 era de 3000 de atomi pentru 100.000 de atomi totali.

Pentru transporturile de minereu de uraniu de la Oklo în Franța, la uzina de prelucrare, respectiv îmbogățirea de la *Pierrelatte*, pentru fiecare șarjă de minereu s-au efectuat analize de control de uraniu-235 prin spectrometrie de masă.

Ca rezultat de așteptat pentru această determinare analitică, concentrația de U-235, la fiecare transport, a trebuit să fie  $0,7202 \pm 0.0006$  %.

#### 6. Apoteoza chimiei analitice a uraniului

În iunie 1972, chimistul analist care a efectuat determinarea analitică de control la uzina de la *Pierrelatte* a obținut valoarea neobișnuită de  $0,7171 \pm 0,0007$  % U-235, deși ar fi trebuit să obțină valoarea indicată mai sus. De remarcat ca infinetesimala deviație ar fi putut să fie considerată ca nesemnificativă. Dacă analistul n-ar fi fost atât de conștiincios, așa cum reiese din cele ce urmează, lumea ar fi rămas mai săracă cu o descoperire foarte importantă. Măsurători repetate de multe ori au dovedit că rezultatul neașteptat nu se datorează vreunei erori banale de măsurare sau de prelucrare a probei. Specialiștii francezi au repetat măsurătorile pentru mai multe sute de probe, în plus au măsurat concentrația U-235 și în  $UF_6$  obținut în procesul de prelucrare a minereului. S-a confirmat că abaterea nu se datorează, în niciun caz, vreunei erori sau impurificări exterioare, și că rezultatele obținute caracterizează un minereu natural având o compoziție anormală. Investigațiile au arătat că în probele de minereu provenite din uzina de la *Mountana din Gabon*, între decembrie 1970 și mai 1972, conținutul mediu de izotop util de uraniu U-235 a fost mai mic decât cel obișnuit. S-a calculat că această anomalie a fost valabilă la peste 700 de tone de uraniu prelucrat. Deficitul de uraniu-235 din toate șarjele luate împreună reprezenta cam 200 de kilograme și acest lucru arată că devierea s-a datorat unei cauze externe de magnitudine considerabilă.

Măsurătorile paralele au demonstrat și că probele provenite dintr-un alt loc de exploatare a minei, folosit cu câțiva ani mai înainte, aveau un conținut incredibil de scăzut de uraniu-235, adică 0,440 %.

În luna august 1972, specialiștii francezi au încercat explicarea devierilor semnificative ale raportului de izotopi de uraniu, prin diverse ipoteze. Singura ipoteză plauzibilă spunea că în zăcămintul de uraniu a avut loc o reacție în lanț fosilă, în vremuri străvechi. A devenit evident că o dovadă în acest sens sunt și produsele de dezagregare ale uraniului prin fisiune în lanț, întrucât compozițiile izotopice, care apăreau la capătul seriilor de fisiune, erau net diferite de elementele naturale. Fisionările în lanț presupuse ale uraniului-235 s-au dovedit a fi de ordinul sutelor de mii de ani, pe o durată de  $2 \times 10^9$  ani. O astfel de frecvență ridicată a fisionărilor poate fi cauzată numai de o reacție în lanț de lungă durată.

În plus, caracteristicile geologice ale depozitelor de minereu de uraniu au arătat că a fost posibilă apariția unei configurații de “masă critică” a uraniului-235, foarte probabilă pentru concentrația de atunci de 3% de U-235 (față de 0,7% de acum). Cercetările specialiștilor francezi efectuate între 1972 și 1975 au ajuns la concluzia că, în zăcămintele de uraniu de la Oklo, concentrația de uraniu-235 și existența fenomenelor climatice naturale favorabile au făcut posibilă apariția și funcționarea unor reactoare nucleare naturale fosile. [10-14]

Demonstrarea existenței acestora a constituit o senzație de nivel mondial și poate fi considerată o contribuție majoră la fenomenele de cunoaștere științifice. În 1975, în diverse locuri în lume, a început studiul extins și aprofundat al fenomenului, au apărut mai multe sute de publicații cu privire la detalierea temei și cercetările continuă și în prezent. [15]

Nu e cazul să ne ocupăm aici de amănunte, dar, totuși, vrem să menționăm o lucrare de ansamblu interesantă [16].

După cele relatate mai sus merită să ne întoarcem la chimistul analitician, amintit la începutul acestui capitol. Fără minuțiozitatea acestuia, descoperirea reactoarelor nucleare naturale fosile de la Oklo n-ar fi avut loc sau ar fi fost făcută, probabil, mult mai târziu.

Literatura temei este nerecunoscută și nu amintește numele analiticianului, dar nici francezii nu accentuează destul profesionalitatea sa deosebită. Ca o compensație întârziată, îi amintim noi aici numele: *Henri Bouziges*. Numele lui apare într-o singură publicație și nici acolo pe primul loc al șirului autorilor. [11]

În sfârșit, trebuie să menționăm că, în decursul celor aproximativ 4000 de milioane de ani ai istoriei

geologice a Pământului, s-au format depozite de uraniu, respectiv îmbogățiri de minereu de uraniu, în locuri diferite de pe glob, și că în acestea se desfășoară astăzi activități semnificative de minerit, respectiv de exploatare minieră. Însă, până acum, în afară de Oklo, nicăieri nu au fost descoperite semne că, pe parcursul milioanele de ani, s-ar fi întrunit acele condiții climatice naturale, care ar fi făcut posibilă la *Oklo in Gabon* apariția unui reactor nuclear natural bazat pe reacțiile în lanț ale uraniului-235.

## 7. Paul Kazuo Kuroda și previziunea retrospectivă

Existența reactorului natural fosil de acum 2000 milioane de ani, descoperită în 1972 și demonstrată în 1975, cu măsurători și investigații, așa cum s-a amintit mai sus, a devenit o senzație științifică mondială și a adus, în mod fulgerător, în atenția lumii științifice articolul lui *Paul Kazuo Kuroda*, publicat în 1956, pe atunci și până în 1972, practic uitat. [7] (Fig. 3).

Fiecare articol, care a apărut până în prezent, relatând noi rezultate parțiale și dovezi pentru mai buna cunoaștere și înțelegere a fenomenului Oklo, citează, aproape fără excepție, în mod recunoscător, articolul lui *Kuroda* din 1956. De aceea, merită să ne întoarcem la condițiile climatice și naturale, pe care în 1956 *Kuroda* le-a prevăzut și le considera necesare ca, undeva pe Pământ, acum mii de milioane de ani, să funcționeze un reactor nuclear folosind reacția de fisiune în lanț a uraniului-235.

Prima condiție, conform lui *Kuroda*, era aceea că dimensiunea zăcămintului să fi fost mai mare decât distanța pe care o pot parcurge neutronii care induc fisiunea. Această distanță este de aproximativ trei sferturi de metru. Această condiție asigură ca un neutron emis dintr-un nucleu de uraniu-235 să fie captat de un alt nucleu, înainte ca neutronul să iasă din minereul de uraniu.

A doua condiție a lui *Kuroda* a fost aceea ca U-235 să fi avut o concentrație suficient de ridicată. În prezent, ca astăzi, nici cea mai bogată mină sau zăcămint de uraniu nu poate deveni reactor nuclear, dată fiind concentrația de 0,72% a U-235, care pur și simplu, nu este suficientă pentru o reacție de fisiune în lanț. După cum s-a menționat, acum 2000 de milioane de ani, concentrația de U-235 a minereului era de aproximativ 3%.

A treia condiție ar fi fost prezența unui “moderator” pentru neutroni, adică o substanță care frânează așa- ziii neutroni rapizi pe care îi emite U-235 prin fisiune și, astfel, aceștia să devină mai potriviți

pentru a lovi și fisiona alți atomi de U-235. Un astfel de moderator poate fi, de exemplu, apa de ploaie.

Și, în sfârșit, în apropierea zăcămintului de uraniu nu ar fi trebuit să fie prezente cantități mari de bor, litiu, vanadiu sau alte așa-numite otrăvuri, care captează neutronii formați prin fisiune, întrerupând, astfel, reacția în lanț. Toate aceste condiții s-au realizat pe vremuri la Oklo.

Ulterior, cercetătorii francezi au confirmat că, în zona minelor Oklo, aceste condiții erau îndeplinite acum 2000 de mii de ani nu numai într-un singur loc, ci în 17 și, în consecință, acolo au funcționat, pentru durate diferite, 17 reactoare naturale.

În lucrarea de ansamblu, citată anterior [16], sunt accesibile detalii cu privire la cercetările geologice, mineralogice, de chimie izotopică și de fizica neutronilor care au contribuit la explicarea exactă a fenomenului Oklo, respectiv la previziunea schițată de *Kuroda*.

Revista internațională *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, fondată, și editată de autorul prezentului articol, l-a invitat pe Profesorul *Kuroda*, în 1990, să prezinte, ca cea mai competentă persoană, circumstanțele previziunii sale, respectiv fenomenul Oklo. *Kuroda* a răspuns pozitiv invitației cu un articol intitulat “*The Pre-Fermi Natural Reactor*” [17]. În continuare, *Kuroda* a devenit un autor-colaborator sistematic și fidel al revistei menționate și a publicat în ea, între anii 1991 și 2000 mai mult de 30 de articole originale pe teme de chimie nucleară. A publicat și o lucrare de ansamblu într-un articol în 2001 [18].

În numărul festiv al revistei amintite mai sus, apărut cu ocazia împlinirii mileniului și în memoria lui *Glenn T. Seaborg* - celebrul chimist nuclearist distins cu premiul Nobel, *Kuroda*, în conformitate cu interesele și cercetările sale de atunci, a publicat un articol cu titlul: *Application of Nuclear Chemistry in the Study of the Universe*” [19].

Poate, că merită să amintim că opinia publică științifică mondială și colegii lui *Kuroda* s-au purtat, la început, într-un mod ingrât și nerecunoscător cu ideile și realizările revoluționare și profetice publicate de el în articolul din 1956 [7].

Într-o convorbire personală, care a avut loc la o conferință ținută la *Oak Ridge SUA*, *Kuroda* i-a spus autorului prezentului articol că a auzit, din mai multe locuri, o afirmație care suna astfel: “*if this idiot is an indication of the program at the University of Arkansas, there must be nothing there at all*”. Și alții au auzit această relatare a lui *Kuroda*, care a și apărut într-unul dintre necrologurile sale. [20]

După descoperirea fenomenului Oklo, în 1972 *Kuroda* a devenit recunoscut și apreciat în toată

lumea. Singur sau în colaborare, a publicat peste 400 de lucrări științifice.

## 8. Post-scriptum

Opinia publică mondială recunoaște că reactorul nuclear, bazat pe principii științifice și dezvoltare tehnologică, a fost inventat de Enrico Fermi și Leo Szilard, în 1942. După cum știe autorul prezentului articol, nici Fermi și nici Szilard nu au cerut și nici nu au primit vreo recompensă sau răsplată materială din brevetarea reactorului nuclear.

După cum s-a descoperit în 1972, *Mama Natura* (Mother Nature) a realizat un astfel de reactor, deja cu vreo două miliarde de ani înaintea Omului. Se pare că, în decursul dezvoltării științifice și tehnice a omenirii, acesta este singurul exemplu cunoscut, în care *Natura* însăși a fost în stare să construiască, folosind conclucrarea împrejurărilor climatice și naturale favorabile, o instalație pe care, mult mai târziu, omul, în acest caz Fermi și Szilard, a realizat-o folosind capacități intelectuale, fără să imite natura, ci independent de aceasta.

Pentru cazul invers, adică acela când omul realizează creații tehnice, imitând natura, sunt cunoscute numeroase exemple.

## Referințe

- [1] [http://brainquote.com/quotes/authors/n/niels\\_bohr.html](http://brainquote.com/quotes/authors/n/niels_bohr.html), printat la 2012. 10. 09.
- [2] <http://wikipedia.org/wiki/Maghasad%C3%A1s>, printat la 2012. 09. 05.
- [3] <http://wikipedia.org/wiki/Nukle%C3%lr%C3%A1ncreaci%C3%B3>, printat la 2012. 09. 05.
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago\\_Pile-1](http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1)
- [5] <http://oklo.curtin.edu.au/who.cfm>, printat la 2012. 08. 23.
- [6] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Atomreaktor>
- [7] P. K. Kuroda, *J. Chem. Phys.*, (1956) 25, 781.
- [8] <http://nuclearweponarchive.org/France/FranceOrigin.html>, printat la 2012.10.08.
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Force\\_de\\_Frappe](http://en.wikipedia.org/wiki/Force_de_Frappe), printat la 2012, 10.08.
- [10] F. Gauthier-Lafaye, F. Weber, *Precamb.Res.*, (2003), 120, 81.
- [11] R. Bodu, H. Bouziges, N. Morin, J. P. Pffelman, *C. R.Acad.Sci.Paris.Ser.D*, (1972), 275, 1731.
- [12] N. Neuilly, J. Bussac, C. Freyacques, G. Nief, G. Vendryes, J. Yvon, *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. D*, (1972), 275, 1847.

- [13] G. Badin, C. Blain, r. Hagemann, M. Kremer, M. Lucas, L. Merlivat, R. Molina, G. Nief, F. Prost-Marechal, F. Regnard, E. Roth, *C. R. Acad. Sci.Paris.Ser.D*, (1972), 275, 2291.
- [14] R. Naudet, *La Recherche*, (1975), 6, 508.
- [15] M. E. Wieser, S. Barry, J. R. De Laeter, *J. Radioanal.Nucl.Chem.*, (2012), 293, 949
- [16] A. P. Meshnik, *Scientific American*, (2005), november, 57.
- [17] P. K. Kuroda, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (1990), 142, 101.
- [18] P. K. Kuroda, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (2001), 247, 249.
- [19] P. K. Kuroda, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (2000), 243, 141.
- [20] A. M. Robertson, Paul Kazuo Kuroda (1917-2001), <http://www.encyclopediaofarkansas.net/encyclopedia/entry-detail.aspxID=6619>,

Articol tradus din limba maghiară de către Dr. Peter Glück (Cluj-Napoca).

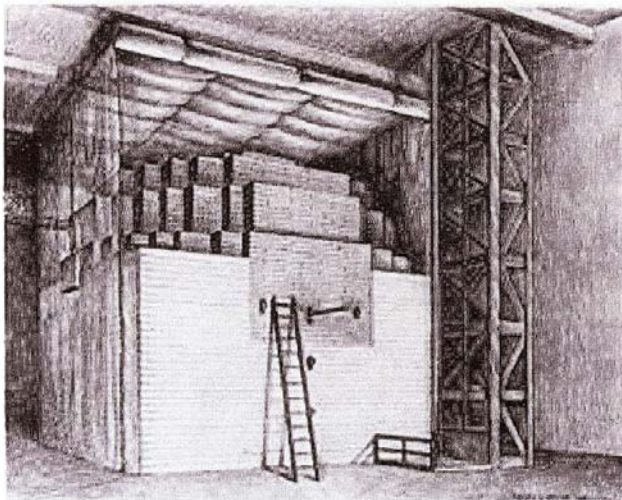


Fig. 1. Schița reactorului (CP-1 construit sub stadionul de "squash" al Universității Chicago.

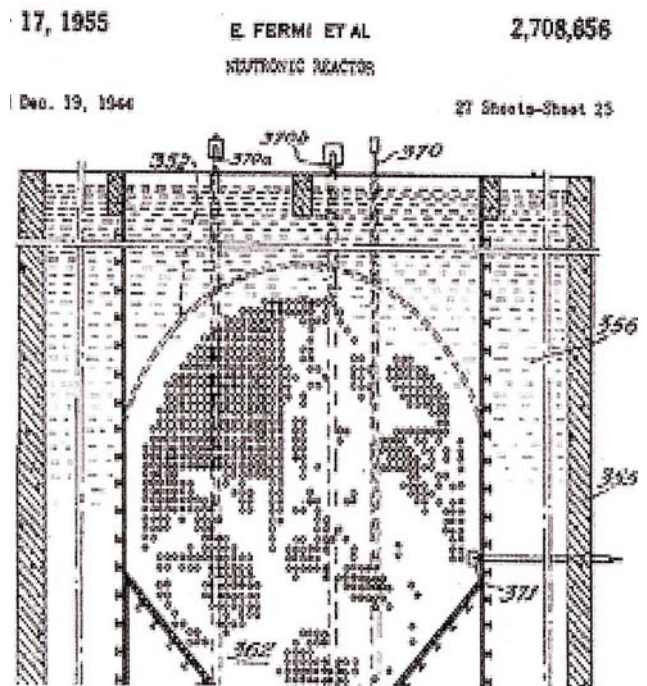


Fig. 2. Parte din cererea de brevet al lui Enrico Fermi și Leo Szilárd solicitat în 1944 dar a devenit public abia în 1955 pentru așa-numitul „Reactor Neutronic”.

**On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals**  
 F. K. KURODA  
 Department of Chemistry, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas  
 (Received July 26, 1956)

**TABLE II.** The water-uranium ratio and the values of  $\rho$ ,  $f$ ,  $\eta$ , and  $k_{\infty}$  (Johanngeorgstadt pitchblende, 2100 million years ago).

$\eta$	1/2	1/3	1	2	3	5	10
$\rho$	0.59	0.47	0.62	0.74	0.79	0.82	0.84
$f$	0.99	0.98	0.97	0.95	0.91	0.91	0.89
$\eta$	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
$k_{\infty}$	0.55	0.88	1.15	1.34	1.40	1.42	1.43

An attempt is made in this paper to apply the nuclear reactor theory in geochronology and to explain certain interrelations between the age and the nuclear physical stability of the uranium minerals, as well as the geological environments of the mineral formation.

The infinite multiplication constant,  $k_{\infty}$ , may be considered as an indicator of the stability of the uranium minerals, which are the natural assemblages of uranium, moderator, and impurities. We may consider a system to be quite "stable" when the infinite multiplication constant of the assemblage is far less than unity. The system will be nuclear physically "unstable," when the infinite multiplication constant is greater than unity.

According to the nuclear reactor theory,

$$k_{\infty} = \rho f \eta \quad (1)$$

where  $\rho$  is the fast fission factor,  $f$  is the resonance escape probability,  $f$  is the thermal utilization factor, and  $\eta$  is the number of fast neutrons available per neutron absorbed by uranium.

When dealing with geological events, the change of the uranium enrichment as a function of geological time should also be taken into consideration. The major neutron sources in minerals are the spontaneous fission and the  $(\alpha, n)$  reactions.

The values of  $\rho$  and  $f$  can be calculated if the chemical composition of the mineral is given,  $\rho$  is always close to unity, and  $\eta$  as a function of the uranium enrichment is known.<sup>1</sup> Hence the value of  $k_{\infty}$  of a mineral at any geological time can be calculated.

Table I shows the calculated values of  $\rho$ ,  $f$ ,  $\eta$ , and  $k_{\infty}$  of a sample of Johanngeorgstadt pitchblende.<sup>2</sup> Similar calculations show that most of the uranium minerals were nuclear physically "stable" during the past 2800 million years, provided the water content of the minerals had remained unchanged during the geological past. It is worthy of note, however, that a slight increase of the water to

uranium ratio could have easily caused a sharp upward change of  $\rho$ , without affecting  $f$  considerably, and the result of which could have been enough to make the system nuclear physically "unstable."

It is generally accepted that the deposition of the uranium minerals took place at the pegmatitic-pneumatolytic and early hydrothermal stages. Hence, one may consider that the crystallization of the uranium minerals represents the following sequence of events. An aqueous solution of uranium ( $U^{+6}$  enriched) gradually converted to an assemblage of uranium plus  $n$  moles of water ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) and finally to an almost water-free uranium mineral.

Let us imagine that the crystallization of the Johanngeorgstadt pitchblende took place 2100 million years ago. The calculated values of  $\rho$ ,  $f$ ,  $\eta$ , and  $k_{\infty}$  are shown in Table II. Table I shows that the assemblages of the Johanngeorgstadt pitchblende plus water were nuclear physically "unstable" 2100 million years ago, and the critical uranium chain reactions could have taken place, if the size of the assemblage was greater than  $257$ , a big mass of a few feet. The effect of such an event could have been sudden elevation of the temperature, followed by a complete destruction of the critical assemblage.

The effect of the ground water or the water vapor from the molten magma could have resulted in the formation of a nuclear physically "unstable" assemblage of uranium plus  $n$  moles of water. Such mechanism might explain the fact that the ages of the large uranium deposits never exceed 2000 million years, or the marked discrepancies exist between the  $Pb^{206}/U^{238}$  age and the  $Pb^{207}/Pb^{235}$  age of the uranium minerals.

This investigation was made possible by support from the U. S. Atomic Energy Commission.

<sup>1</sup> The method of calculations is described in the following reference book: Samuel Glasstone, *Principles of Nuclear Reactor Engineering* (Princeton University Press, Princeton, 1955); Raymond L. Murray, *Introduction to Nuclear Engineering* (New York, 1954); Richard Stephenson, *Introduction to Nuclear Engineering* (New York, 1954).

<sup>2</sup> F. W. Clarke, *The Data of Geochemistry* (Washington, 1924).

Fig. 3. Articolul din 1956 care relatea presupunerea lui Kuroda.





Fig. 4. Chimistul nuclear Paul Kazuo Kuroda, 1917-2001.



Fig. 6. Mina de suprafață Oklo.

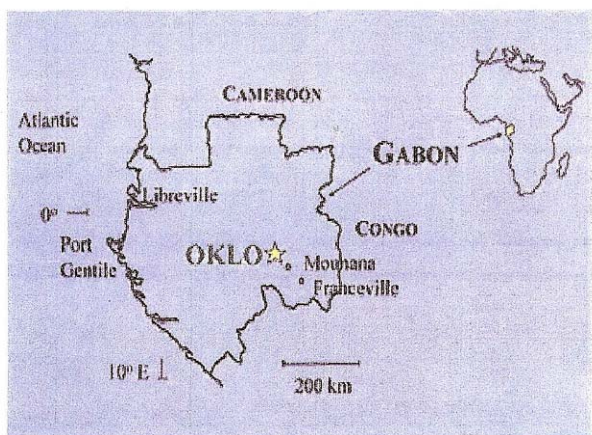


Fig. 5. Republica Gabon din Africa Centrală și regiunea minieră Oklo.

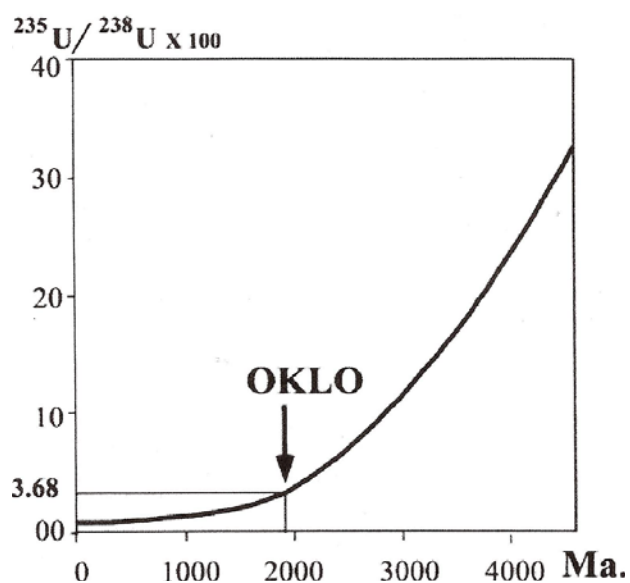


Fig. 7. Raportul izotopilor uraniu-235/uraniu-238 în scoarța pământului. La timpul arătat în figura la Oklo concentrația uraniului-235 a fost de aproximativ 3.68 %<sup>11</sup>.